

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

LIBEREC 2013

KAREL BORKOVEC
KMI005

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ

**ANALÝZA OPOTŘEBENÍ HOKEJEK Z
VLÁKNOVÝCH KOMPOZITŮ**

**ANALYSIS OF WEAR OF HOCKEY STICKS
MADE OF FIBER COMPOSITES**

LIBEREC 2013

KAREL BORKOVEC

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (2012/2013)

Pro: Karel Borkovec

Název: Analýza opotřebení hokejek z vláknových kompozitů

Seznam literatury:

1. Anderson, R.L.: Experimental Characterization of Ice Hockey Sticks and Pucks, [online]. Master Thesis, Washington State University, 2008. Dostupné z WWW: http://www.dissertations.wsu.edu/Thesis/Spring2008/R_Anderson_042308.pdf.
2. Long, A.C.: Design and manufacture of textile composites, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge England, 2005.
3. Interní informace firem zabývajících se výrobou kompozitních hokejek.

Zadání:

1. Proveďte literární rešerši k danému tématu.
2. Charakterizujte kompozitní hokejky z hlediska jejich struktury, vlastností a jejich použití.
3. Specifikujte metody testování struktury a vlastností kompozitních hokejek.
4. Navrhněte metodiku pro komplexní analýzu opotřebení kompozitních hokejek a proveďte experiment.
5. Vyhodnoťte a diskutujte získané výsledky.

Vedoucí BP: Ing. Blanka Tomková, Ph.D.

Rozsah: 30-40 stran

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl velmi poděkovat své vedoucí bakalářské práce paní Ing. Blance Tomkové za odborné vedení, rady a cenné připomínky, které mi udělovala při zpracování bakalářské práce. Rád bych také poděkoval Ing. Miroslavě Maršálkové za pomoc při práci v laboratoři.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá strukturou, vlastnostmi a využitím kompozitových vláken se zaměřením na hokejové hole. Využití kompozitů na výrobu hokejek v poslední době stoupá kvůli jeho vhodným vlastnostem tohoto materiálu, především jeho tuhosti a pružnosti v porovnání s dříve používaným dřevem. V praktické části práce je popsán provedený laboratorní experiment zkoumající modul pružnosti v ohybu a odolnost při dynamickém rázovém namáhání.

Klíčová slova: kompozity, vlákna, hokejové hole, pružnost, opotřebení

Astract

This thesis deals with the structure, properties and use of composite fibers with a focus on hockey sticks. Use of composites for production of hockey sticks is recently increasing due to its good properties of the material, especially its stiffness and flexibility in comparison with previously used wood. In the practical part of the thesis is described performed laboratory experiment investigating the modulus of elasticity and resistance to dynamic impact loading.

Key words: composites, fibers, hockey sticks, elasticity, wear

Obsah

ÚVOD	7
1. Kompozitní materiály	9
1.1 Vláknové kompozity	10
1.2 Vyztužování nekonečnými vlákny	11
1.3 Vyztužování krátkými vlákny	11
1.4 Vyztužovací vlákna pro výrobu kompozitů	12
1.5 Vyztužování textilními vlákny (textilní kompozity)	13
1.5.1 Stanovení mechanických vlastností kompozitů	13
2. Využití textilních kompozitů ve sportech	15
2.1 Využití kompozitů pro výrobu hokejek	19
2.2 Výroba hokejek	19
2.3 Obecné trendy hokejek pro lední hokej	20
2.4 Vybrané vlastnosti hokejek	21
2.5 Druhy kompozitových hokejek	22
2.6 Parametry hokejek	23
3. Testy prováděné na hokejových holích v minulosti	24
3.1 Modální analýza	25
3.1.1 Přenos vibrací z hole na hráče	26
3.1.2 Tlumení	29
4. Testování opotřebení kompozitních hokejek	32
4.1 Základní parametry zkoušených vzorků	33
4.2 Zkouška 3bodým ohybem pomocí dynamometru	34
4.2.1 Postup zkoušky	34
4.2.2 Výpočty pro vyjádření výsledků	35
4.2.3 Výsledky zkoušky 3bodým ohybem	36
4.3 Charpyho test	38
4.3.1 Postup zkoušky	38
4.3.2 Výpočet energie působící při nárazu na vzorek:	39
4.3.3 Výsledky Charpyho testu	39
Závěr	41
Literatura:	43
Přílohy	44

ÚVOD

Používání kompozitních materiálů se čím dál více rozšiřuje pro výrobu produktů v mnoha oblastech, čímž nahrazují zastaralé původní materiály. Sportovní náčiní je v poslední době také vyráběno ze stále kvalitnějších materiálů kvůli vysokým nárokům sportovců.

Při hledání vhodného materiálu, kterým by bylo vhodné nahradit dřevěné hokejky, vyzkoušeli vědci kompozitová vlákna. Nyní již kompozitové hokejky dokonale ovládly trh. Dnes hraje 90% hráčů s kompozitem, 10% pak s hokejkami ze dřeva. Velikému rozmachu napomohly určitě výborné vlastnosti kompozitových holí, mezi které patří nízká hmotnost, vysoká odolnost hokejky a pružnost, díky které má střela větší razanci. Kromě hokejových holí jsou kompozity používány i pro výrobu přileb či bruslí.

Cílem práce je porovnat změny v míře opotřebení a pokles mechanických vlastností hokejových holí vlivem každodenního používání hole při reálném používání hokejistou.

Experimentem bude zkoumáno, jak je hokejová hůl opotřebovávána jejím používáním. Budou testovány vzorky 3 vybraných hokejek různých typů. Aby bylo možné stanovit míru opotřebení, jsou od každého typu hokejky vybrány vzorky, které byly používány různě dlouhou dobu. Vzorky budou podrobeny zkoušce 3bodým ohybem a Charpyho zkoušce. Zkouškou 3bodým ohybem bude možné stanovit napětí v ohybu a modul pružnosti v ohybu, což vyjadřuje pružnost materiálu. Na základě výsledku testy tedy bude možné stavovat, která z testovaných hokejek ztrácí pružnost nejvíce. Charpyho zkouškou bude zkoumáno, jak velká energie je potřeba k porušení zkoumaného vzorku. Hokejka, která obstojí v Charpyho zkoušce nejlépe, bude ztrácet svou pevnost nejméně.

V první části mé bakalářské práce je využito dostupné české i zahraniční literatury, na základě které je uveden podrobný popis vláken používaných pro výrobu kompozitů a také struktura kompozitu.

Druhá kapitola se specializuje na využití kompozitních vláken v oblasti sportovního náčiní, především pro výrobu hokejových holí. Pro přiblížení tématu je popsán postup výroby kompozitních holí a jejich rozdělení a typy. V kapitole jsou zmíněny hlavní důvody, proč se kompozitní materiály hodí právě pro výrobu hokejových holí.

Třetí kapitola čerpala z již provedeného experimentu na Washington State University. Bylo laboratorně zkoumáno chování hokejových holí při různých typech střel jako např. tlumení a přenos vibrací a pružnost hole při simulované střele se srovnatelnou intenzitou jako při skutečné hře. Součástí těchto testů bylo také porovnávání kompozitových a dřevěných holí.

Poslední kapitola je věnována vlastnímu experimentu, jehož úkolem je splnit cíl práce a tedy provést odpovídající testy, na základě kterých bude možné vyvodit závěry o zkoumaných hokejových holích a určit nejvhodnější typ hokejky, který podléhá opotřebení nejméně.

1. Kompozitní materiály

Kompozity jsou heterogenní materiály, které se skládají ze dvou a více fází (nebo složek). Tyto fáze (složky) se od sebe mohou lišit mechanickými, fyzikálními a chemickými vlastnostmi. Pro kompozity je charakteristická synergie těchto složek, díky které výsledný materiál získává některé nové vlastnosti. Synergický efekt spočívá v tom, že spojením jednotlivých částí v jeden celek získáme lepší vlastnosti celkového výrobku, než kdybychom jen sčítali vlastnosti jednotlivých složek obsažených ve výrobku. Spolupráce složek, které jsou v konstrukčních kompozitech jednoznačně definovatelné, probíhá prostřednictvím rozhraní mezi těmito složkami. (1)

Fáze (složky) jsou na rozhraní téměř vždy v tuhém stavu. Jedna z fází je tzv. primární, většinou spojitá, a nazývá se matrice. Další fáze jsou sekundární, nespojité, tyto fáze jsou nazývány výztuže. Sekundární fáze se zpravidla vyznačuje výrazně vyššími mechanickými vlastnostmi než fáze primární. Sekundární fáze má za úkol dodat kompozitu výslednou tuhost, pevnost, tvrdost a jiné mechanické vlastnosti.

Rozhraní mezi fázemi (složkami) je další významnou součástí kompozitní struktury. Když na sebe vzájemně působí fáze, které mají různé fyzikální a chemické vlastnosti, tak nemůžeme brát za rozhraní pouze plochu vzájemného kontaktu, ve které díky chemickým a fyzikálním vazbám dochází k různě dokonalé soudržnosti mezi fázemi. Jako součást rozhraní mezi fázemi musíme brát také tenkou vrstvu v okolí kontaktu ploch. Tato plocha bývá místně deformovaná důsledkem rozdílných koeficientů teplotní roztažnosti a tuhosti fází. I když je chemické složení matrice v celém objemu stejné, má vrstva na rozhraní matrice jinou morfologii než uvnitř matrice. To má za následek, že molekulární segmenty v hraniční vrstvě mají sníženou pohyblivost, hlavně pokud dojde k pevnému zakotvení makromolekul primární fáze (matrice) na povrchu sekundární fáze (výztuži). Pokud dojde k pevnému spojení primární a sekundární fáze, vznikne tzv. imobilizovaná vrstva, která má za následek větší tuhost a menší schopnost plastické deformace. Proto se tato oblast matrice liší svými vlastnostmi od části matrice, která je dál od sekundární fáze a není jí ovlivněná. (2)

Podle povahy výztuže dělíme kompozitní materiály na:

- a) Částicové kompozity – vyztužující částice mohou mít tvar kulový, destičkový, tyčinkovitý i nepravidelný. U těchto kompozitů jeden rozměr útvaru výztuže výrazně nepřesahuje další rozměry útvaru kompozitu.
- b) Vlákňové kompozity – tyto kompozity se vyznačují tím, že útvar výztuže je vlákno. Vlákna jsou útvary, které v jednom směru mají značně větší rozměr než v ostatních směrech. Tyto kompozity dále dělíme podle délky vyztužujících vláken na kompozity s krátkými vlákny nebo kompozity s dlouhými (kontinuálními) vlákny. V kompozitních materiálech s krátkými vlákny je délka

vyztužovacích vláken výrazně menší, než je velikost výrobku. V kompozitech s dlouhými vlákny je délka vláken srovnatelná s velikostí výrobku.



Obrázek č. 1 Rozdělení kompozitních materiálů

Zdroj: S. Michna, Technické materiály II., Fakulta výrobních technologií a managementu Univerzity J. E. Purkyně v Ústí nad Labem, Učební text určený pro kombinované a prezenční studium

Podle povahy matrice dělíme kompozitní materiály na kompozity s kovovou matricí (metal matrix composites – MMCs), s polymerní matricí (polymer matrix composites – PMCs), s keramickou matricí (ceramic matrix – CMCs), se skleněnou matricí a s uhlíkovou matricí.

1.1 Vláknové kompozity

Pokud chceme, aby výsledný kompozit měl určitou požadovanou tuhost a pevnost, musíme použít vhodný typ vláken a zvolit jejich objemový podíl v kompozitu. Pro představu uvádím tabulku některých průmyslově vyráběných vláken s jejich mechanickými vlastnostmi.

vlákno	modul pružnosti $\frac{E}{\text{GPa}}$	pevnost v tahu $\frac{\sigma_{p1}}{\text{GPa}}$	hustota $\frac{\rho}{\text{kg m}^{-3} \cdot 10^{-3}}$	pořadí výhodnosti podle kritéria	
				(E/ρ)	(σ_{p1}/ρ)
sklo E*)	70	3 až 4	2,5	7	2
sklo S**)	80	4,5	2,5	6	1
uhlík***) – typ 1	385	2,0	1,9	1	2
uhlík***) – typ 2	260	2,5	1,9	4	4
uhlík***) – typ 3	200	2,5	1,8	5	3
bor	450	2,4	2,4	2	5
ocel	210	2,5	7,8	8	7
beryllium	315	1,3	1,8	3	6
wolfram	350	2,5	19,0	9	8
Kevlar 49****)	120	2,75	1,5	6	2

*) Eutektický systém o složení 62 % SiO_2 ; 14,7 % Al_2O_3 ; 23,3 % CaO .

**) Eutektický systém o složení 65 % SiO_2 ; 25 % Al_2O_3 ; 10 % MgO .

***) Se vzrůstajícím číslem roste pevnost v tahu, klesá modul pružnosti E .

****) Vysoce orientované vlákno z poly(*p*-fenylenetereftalamidu).

Tabulka č.1 Modul pružnosti E a pevnost v tahu průmyslově vyráběných vyztužujících vláken

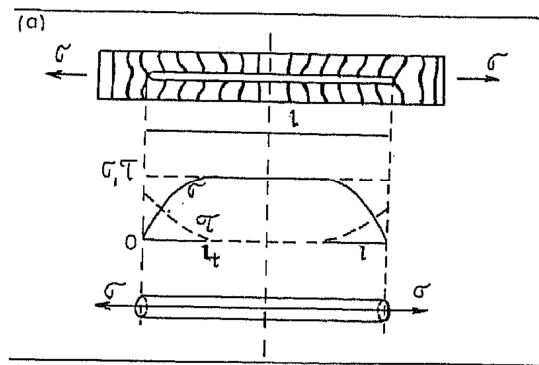
Zdroj: B. Meissner, V. Zilvar, Struktura a vlastnosti polymerních materiálů, Studijní materiál Vysoké školy chemicko-technologické v Praze

1.2 Vyztužování nekonečnými vlákny

Pokud jsou jako výztuž použita vlákna s dostatečnou tuhostí a pevností a je zajištěna soudržnost mezi vlákny a matricí až do lomu kompozitu, tak jsou vnější síly přenášeny hlavně výztuží. To je podmíněno tím, že tažnost matrice je větší než tažnost vláken. Jestliže je tažnost vláken větší než tažnost matrice, tak matrice nezajistí celistvost kompozitu a nevyužije se optimálně pevnost vyztužujících vláken.

1.3 Vyztužování krátkými vlákny

Namáhání, které působí na kompozit, je přenášeno z matrice do vláken smykovým napětím. Toto smykové napětí působí na povrchu vlákna. Velikost smykového napětí se mění z okraje vlákna směrem k jeho středu dle obrázku. Na okrajích vlákna je tahové napětí, které se přenáší z matrice do vlákna smykovými silami nulové. (2)



Obrázek č. 2 Smykové napětí ve vláknu

Zdroj: B. Meissner, V. Zilvar, Struktura a vlastnosti polymerních materiálů, Studijní materiál Vysoké školy chemicko-technologické v Praze

1.4 Vyztužovací vlákna pro výrobu kompozitů

Z hlediska pevnosti a tuhosti jsou na tom nejlépe kompozitní materiály s kontinuálními vlákny. Vlákna obsažená v kompozitech mají průměr 10^0 až 10^2 μm . Pokud by průměr vlákna byl menší, jednalo by se o nanovlákna a hovořili bychom o nanokompozitech. Pokud bychom srovnali pevnost nějakého materiálu v kompaktní formě a pevnost vlákna ze stejného materiálu, tak pevnost vláken bude vyšší, protože vlákna mají malý příčný průřez a plochu. Tím jsou minimalizovány rozměry vrozených vad a povrchových vad.

Kontinuální vyztužující vlákna mohou být anorganická (skleněná, čedičová, uhlíková nebo keramická) nebo polymerní (aramidy, aromatické polyestery, PEEK vlákna apod.). Jednotlivá vlákna jsou sdružována do pramenů, které mohou být zpracovány na další polotovary, např.:

- Sekané prameny – nasekání pramenů na vhodné délky pro přípravu lisovacích a vstřikovacích směsí
- Mletá vlákna – se používají u křehkých vláken pro vytvoření krátkých vláken pomocí mletí
- Pramen – sdružená vlákna bez zákrutů
- Kabílky (rovingy) – jsou sdružené prameny, které mají méně než 40 zákrutů na 1m, používají se pro tažení kompozitních profilů a pro navíjení

- e) Jednoduché příze – používají se k výrobě technických tkanin, příze je navinuta na kónických cívkách, dochází ke sdružování a zakrucování pramenů
- f) Rovingové tkaniny – se vyrábějí tkaním rovingů (kabílků), použití při kontaktním laminování, pultruzi, navíjení a pro výrobu tkaninových prepregů, charakterizují se tzv. gramáží, která udává hmotnost g/m², jemnost a typ vazby. Vazby mohou být plátno, kepr, atlas.
- g) TexTreme – tkaniny švédské firmy Oxeon, vyrábějí se splétáním pásků o šířce 20 až 50mm. Touto technologií se dají vyrábět i hybridní tkaniny. Kombinací pásků z odlišných materiálů můžeme získat například nižší hmotnost. Tyto tkaniny mají výhodu, že se nevlíní a umožňují dosáhnout velký objemový podíl vláken, to je způsobeno tím, že mají menší množství otvorů v porovnání s běžnými tkaninami
- h) Hybridní tkaniny – kombinace různých druhů vláken, například uhlíková + skleněná
- i) Tkaniny z příze – užití v oblasti filtrů, izolací a geotextilií
- j) Rohože – netkané textílie, rouna. Při použití kontinuálních vláken, vlákna drží u sebe vzájemnou soudržností, při použití sekaných vláken, jsou vlákna spojena polymerními pojivy
- k) Prepregy – role nebo kotouče různých šíří, obsahující paralelně uspořádané rovingy, tkaninu nebo rohož a polovytvrzenou matici z reaktoplastu nebo termoplastu.²

1.5 Vyztužování textilními vlákny (textilní kompozity)

Textilní kompozity mají výhodný poměr pevnosti a tuhosti k celkové hmotnosti materiálu. Aby bylo možné maximálně využít těchto vlastností, je nutné mít dobré znalosti o chování kompozitů pod zátěží. To lze zjistit využitím vhodných testů porušení. Za normálních okolností jsou kompozity (zejména vyztužené termosety) lineárně elastické až do meze porušení.

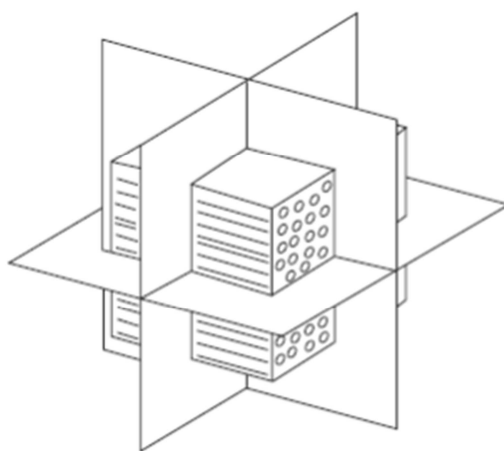
V poslední době roste zájem nejen o vlastnosti kompozitu do meze poškození, ale také o zhoršování vlastností struktury v probíhajícím procesu poškozování.

1.5.1 Stanovení mechanických vlastností kompozitů

Elasticita

Aby bylo možné analyzovat chování vyztužených textilních kompozitů, je nutné nejprve pochopit

pojmy anizotropní a ortotropní chování, a zavést příslušné pojmy pro analýzu laminátu. Při přiblížení na mikroskopickou úroveň, jsou textilní kompozity (bez ohledu na jejich materiálovou strukturu) sestaveny ze svazků paralelních vláken vložených do matrice (předpokládá se, že tyto složky jsou pevně spojeny), která je obvykle polymerní a má mnohem nižší pevnost i modul pružnosti než vyztužující vlákna. Je obvykle považována za homogenní a izotropní (tj. vlastností se nemění po celou dobu bez ohledu na postavení nebo orientaci vláken). Taková struktura bude mít mnohem větší tuhost a pevnost ve směru osy vláken, než v každém jiném než kolmém směru na osu vláken. Obrázek č. 3 ukazuje idealizaci této struktury, kde symetrie struktury je zřejmá, a umožňuje nám zjednodušit nakládání s pružným chováním v obecném případě pravé anizotropie (materiálové vlastnosti se liší ve všech směrech bez symetrie).



Obrázek č. 3 Schématický diagram kompozitu s vyztuženými vlákny jako ortotropní těleso, znázorňující 3 linie symetrie

Zdroj: Long, A.C.: Design and manufacture of textile composites, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge England, 2005

Pružné chování (tj. vztah mezi stresem a napětím ve třech hlavních směrech) materiálu, který má tři takové roviny symetrie, se označuje jako ortotropní konstitutivní model. Ten je definován třemi elastickými moduly E_1 , E_2 a E_3 , třemi na sobě nezávislými Poissonovými poměry ν_{12} , ν_{23} a ν_{31} a třemi smykovými moduly G_{12} , G_{23} a G_{31} . Tři další Poissonovi poměry se vztahují k výše uvedeným modulům a Poissonovým poměrům:

Rovnice č. 1

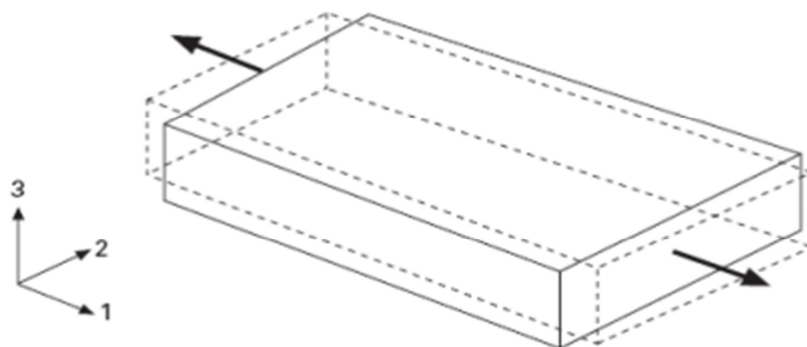
$$\nu_{21} = \nu_{12} \frac{E_2}{E_1}; \nu_{32} = \nu_{23} \frac{E_3}{E_2}; \nu_{13} = \nu_{31} \frac{E_1}{E_3} \quad (1)$$

Pružné chování může být vyjádřeno prostřednictvím Hookova zákona pro ortotropní materiály:

Rovnice č. 2

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \frac{1}{E_1} (\sigma_1 - \nu_{12}\sigma_2 - \nu_{13}\sigma_3) \\ \varepsilon_2 &= \frac{1}{E_2} (\sigma_2 - \nu_{21}\sigma_1 - \nu_{23}\sigma_3) \\ \varepsilon_3 &= \frac{1}{E_3} (\sigma_3 - \nu_{31}\sigma_1 - \nu_{32}\sigma_2) \\ \gamma_{12} &= \frac{\tau_{12}}{G_{12}} \quad \gamma_{23} = \frac{\tau_{23}}{G_{23}} \quad \gamma_{13} = \frac{\tau_{13}}{G_{13}}\end{aligned}\quad (2)$$

Tato rovnice je zobecněním izotropního trojrozměrného (3D) projevu Hookova zákona. V praxi nás obvykle zajímá tenká vrstva nebo lamina materiálu. V tomto případě může být předpokládáno, že napětí jdoucí skrz tloušťku (definované jako σ_3) je zanedbatelné a pnutí jdoucí skrz tloušťku (ε_3) je nevýznamné. (3)



Obrázek č. 4 Schéma ortotropního tělesa při napínání

Zdroj: Long, A.C.: Design and manufacture of textile composites, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge England, 2005

2. Využití textilních kompozitů ve sportech

Původně se ve sportech používaly hlavně přírodní materiály. Jedním z nejpoužívanějších materiálů bylo například dřevo. Mezi výhodu dřeva patří, že má dobré tlumení rázů, ale na druhou stranu má také hodně nevýhod. Mezi nevýhody toho materiálu patří dle Jenkinse a Axtella [zdroj] jeho přírodní anizotropní struktura, která má za následek nižší pevnost vůči silám působícím kolmo ke směru

vláken. Další nevýhodou jsou velké rozdíly ve vlastnostech a vysoká absorpce vlhkosti. Ta má za následek nežádoucí deformace dřevěných konstrukcí.

V roce 1970 se začaly využívat lehké kovy, jako hliník a titan. Ty poskytovaly vyšší tuhost a výrazné snížení hmotnosti. Kombinace těchto vlastností a jejich velká flexibilita vedly k vývoji nových tvarů. Na druhou stranu je např. hliník velice náchylný k opotřebení. Další nevýhodou hliníku je jeho vysoká rázová propustnost (což způsobuje např. tenisový locket) a vlastní izotropní charakter, který neumožňuje variabilitu mechanických požadavků v různých směrech (na rozdíl od kompozitů). Později začaly být tyto kovy nahrazovány kompozity v kombinacích sklo-epoxid, uhlík-epoxid, uhlík/kevlar-epoxid apod. Tyto anizotropní materiály dovolují zlepšení mechanických vlastností pouze na určitých místech, na kterých se předpokládá větší namáhání.

Vyztužující vlákna

- Sklolaminát
- Uhlík
- Kevlar
- Bor

Sklolaminát je dnes nejpoužívanější kompozitní materiál. Vyztužení skleněnými vlákny se používá ve většině odvětví. Jeho tuhost je stejná jako u oceli. Je pružnější a odolnější než uhlík. Dle podle Spencera (9) a Jacobyho (10) je jeho použití pro sportovní vybavení omezeno, kvůli jeho špatné odolnosti vůči námaze, což způsobuje větší opotřebení, a vysoké propustnosti vibrací.

Uhlíková vlákna jsou pět krát tužší než skleněná vlákna. Díky dobré odolnosti proti únavě mají využití například pro lehké a pevné rámy kol. Pro některé sportovní náčiní může být nevýhodou jeho vibrační propustnost.

Kevlar je poly-aromatický amid, který je lehký, poskytuje pevnost v tahu a houževnatost v kombinaci s dobrým tlumením vibrací a odolností proti rázům. Používá se pro lyže a také pro mnoho typů ochranného vybavení.

Bor je mnohem pevnější než uhlík a jeho kompresní vlastnosti jsou obzvláště dobré. Kombinace uhlíku (tuhost v tahu) a bóru (tuhost v tlaku) má ve výsledku synergický účinek, tj. celková tuhost je lepší, než by se předpokládalo na základě individuálního porovnání pevností jednotlivých vláken. Bor může být například použit jako podélná výztuž pro golfové hole. Schopnost tlumení a odolnost proti únavě může být dále zvýšena použitím polyethylenových (PE) vláken. Používá se například zesílení uhlíkovými vlákny a PE vlákny pro jízdní kola. Další snížení hmotnosti je také možné pomocí vláken s ultra-vysokým modulem.

Polymerní matrice

Pryskyřice

Pryskyřice se vyznačují dobrým tlumením vibrací (mnohem lepším než mají kovy). Konvenční tvrditelné pryskyřice (například polyesterové nebo epoxidové) jsou často kombinovány s epoxidovými a gumovými modifikátory, které snižují přenos vibrací. U některých sportů je žádoucí, aby přenos vibrací na uživatele nebyl zcela odstraněn, protože vibrace dávají uživateli informace, zda byl například míč dobře odehrán.

Termoplasty nabízejí velmi vysokou tuhost a trvanlivost oproti termosetům, které mají vyšší toleranci poškození, jsou o 100% tužší a o 600% odolnější vůči trhlinám a neviditelnému poškození. Proto jsou ideální pro použití na výrobu vybavení, která jsou hodně namáhána, jako jsou hokejové hole. Přenos kmitání a vibrací je vyšší u konvenčních uhlíkových či epoxidových tenisových raket než u těch s polyuretanovými modifikovanými epoxidovými matricemi, a rozhodně vyšší než u těch s termoplastickou polyamidovou-6 matricí. Ta absorbuje více vlhkost, ale to jen dále snižuje přenos vibrací.

Design

Použitím různých vláken a jejich vzájemným provázáním pod různými úhly (výztužné tvary), různé vrstvy nebo tloušťky, různé (kombinace) materiálů, atd., může přispět k eventuálním výsledným vlastnostem kompozitu. Některými speciálními technikami, které konkrétně nesouvisí s kompozity (př. microbearings nebo celková modifikace tvaru), se dá dosáhnout stejného efektu.

Struktura

Pletené výztuže kombinují vícesměrné provázání vyztužujících vláken s automatizovaným procesem, vysokou uniformitu, párové překrývání švů a dobré zavěšovací vlastnosti. Úhel a tloušťka výztuže mohou být velmi rozmanité, což vede k variabilitě výrobků, jako jsou baseballové pálky, které mohou být přiměřeně vyztuženy v blízkosti oblasti maximálního namáhání, a to na rukojeti. Použití pletenců také snižuje kroucení - ve srovnání s jednosměrnými výztužemi – například při použití pokovaných stuh u tenisových raket.

Vazby mají nižší splývavou vlastnost a často je nutné použít překrývání k tomu, aby byl zajištěn hladký přenos zatížení mezi různými vrstvami. Mohou být například použity v kombinaci s jednosměrnou výztuží, aby se vytvořily tenisové rakety s vysokou pevností ve smyku a tuhostí (snížení krouticího momentu).

Koncept "Umístění vlákna na míru" (TFC – tailored fibre placement) stojí za zmínku. Vláknenné polotovary, kde mohou být vlákna orientována dle námahy, mohou být provedeny na základě výšivkové techniky, která se používá také pro zdobné účely. Tato technika je vhodná pro lehké díly,

kteře mají komplikované namáhání, jako jsou například rámy jízdních kol a brzdne posilovače. Zcela jednosměrné výztuže můžou být také použity. Ty vedou k výbornému tahu za ohybu a pevnosti a tuhosti, ale velmi omezené odolnosti proti zkroucení. Obecně platí, že několik forem výztuží se kombinuje za účelem získání požadované kombinace ohybových, tahových a kroutících vlastností.

Je důležité vybrat si materiál podle požadovaného účelu. Tužší materiály, jako je sklo, uhlík, grafit a aramid se používají v případě, pokud chceme dosáhnout například vysoké rychlosti. Jestliže ne, část energie, která byla vložena do tohoto systému, může být ztracena v deformacích. Dobrým příkladem jsou vnější části bruslí.

Méně tuhé materiály jsou na druhé straně zapotřebí, pokud je požadován menší nebo větší stupeň deformace kvůli absorbování rázů. Mezi dobré příklady patří ochranné pomůcky, ale také vnitřní vystýlka brusle. Ta může být například vyrobena z tepelně tvárné pěny ve směsi s uhlíkovými vlákny. Když se brusle předeheřejí, je žádoucí, aby se po utažení na noze vnitřek brusle následně vytvaroval podle chodidla uživatele a ta mu při bruslení perfektně seděla na noze.

Rozdíly ve výztuži a pryskyřici umožňují posun umístění těžiště výrobku. Například konce kajaků mohou obsahovat více (lehčí) PE než zbytek lodi. To umožňuje, aby se kajak snadněji pohyboval po vlnách. Jinými příklady jsou lyžařské hůlky a golfové hole, kdy přenesení těžiště může poskytnout větší rychlost a lepší rovnováhu. Pólové klenby jsou další možný příklad. Jsou vyrobeny tužší na zadním konci za použití směsi uhlíku a sklolaminátu za účelem získání optimálních vlastností. Kombinace s jinými ne-kompozitními materiály se může skládat z použití pěny nebo voštinové struktury s cílem snížení hmotnosti a zvýšení pevnosti v ohybu např. pěny s uzavřenými póry mezi dvěma vrstvami laminátu v lodích, zatímco polyuretanové (PUR) pěny nebo voštiny se používají v jádrech lyží. Quaresimin zmiňuje použití epoxidové pěny mezi vrstvami uhlíku / epoxidu pro výrobu klik jízdních kol. Použití lehčí pěny jen mírně ovlivní konkrétní vlastnosti konečného produktu. Tlumení kaučuky nebo termoplasty může být použito pro tlumení vibrací u tenisových raket. "ISIS" (dopad systému izolace šoku) v tenisových raketách se například skládá z oddělené grafitové páky, která je znovu spojena pomocí grafitové tyče obalené v elastomeru PUR nebo termoplastické (např. nylonové) pryskyřici.

Celkově mohou být konstrukční prvky také účinné při snižování točivého momentu. Ztužením obou stran oblasti krku a cross-baru pomocí titanu / grafitu v tenisových raketách místo použití pletené výztuhy také snižuje točivý moment. (3)

2.1 Využití kompozitů pro výrobu hokejek

Do roku 1990 se kompozitní materiály používali převážně pouze ve vojenském průmyslu kvůli jejich vysoké ceně. Po roce 1990 se vyztužující vlákna začala vyrábět ve větší míře, což vedlo ke snížení ceny výsledných kompozitů. Díky tomu se na trhu začalo objevovat více konkurenčních firem, čímž se kompozity dostaly do více oblastí. Jednou z těchto oblastí byl lední hokej, kde se používají například pro výrobu hokejek.

Lední hokej je sport, kde je důležitá odolnost proti nárazům. Vysoce namáhané sportovní potřeby, jako jsou kompozitové hokejové hole, mohou být vyztuženy kombinací nylon/ uhlík. Termoplastická matrice pak poskytuje houževnatost a rázovou odolnost. Hokejové brusle jsou nejčastěji vyráběny kombinací termoplastických matric a tuhého vlákna jako je sklo, uhlík nebo kevlar. Čím tužší vlákna jsou použita, tím méně energie bude zbytečně vyplýváno na deformace. Patový stabilizační klín ze termoplastických elastomerů, může zlepšit bruslařovu efektivitu tím, že umožňuje protažení skluzu více dopředu než u tradiční brusle. Vnitřek brusle může být vyroben z tepelně tvárné pěny vyztužené uhlíkovými vlákny. Bota se předehtřeje, uživatel do ní vloží nohu a uvnitř dojde k perfektnímu vytvarování přesně na nohu.(3)

2.2 Výroba hokejek

Kompozity se používají jak k vytváření dutého shaftu tak i k posílení dřevěných hokejek. Tyto materiály jsou obvykle tužší a lehčí než sklolaminát.

Kompozitové hokejky

Primární posilující vlákno používané v kompozitových hokejkách je grafit. Kevlar, který se používá v neprůstřelných vestách a Nomex, používaný v ohnivzdorných oblecích závodníků rallye jsou také používány, ale v malých množstvích, oba jsou drahé a poněkud těžší k použití. Většina výrobců kompozitních shaftů používá pre-preg kompozit, který byl nasycen epoxidovou pryskyřicí, která ho propojuje. Obecně se dá říci, že čím je poměr uhlíkových vláken větší, tím je hokejka pevnější a odolnější (kvalitnější). Naopak čím je poměr skleněných vláken větší, tím je méně kvalitní. Poměry, počty vláken v kompozitu a vlastní výrobu si každý výrobce chrání.(4)

Formovací proces

Několik vrstev kompozitního materiálu je zabaleno ve 12 až 15 vrstvách kolem formy ve tvaru hotového shaftu a pak zahříváno a stlačeno. Vrstvy kompozitního materiálu jsou spojeny dohromady pomocí voděodolné pryskyřice. Používají se 3 metody. První metoda využívá tradiční hydraulický lis. Forma s obaleným kompozitem je umístěna v jiné dílčí formě nesoucí jeho zrcadlový obraz, vnější

forma se uzavře a hydraulický tlak stlačuje kompozitní materiál. Druhá metoda používá podtlak, který tlačí kompozit proti formě a tím přebírá její tvar. Třetí metoda používá nafukovací vak jako vnitřní formu. Vak s obaleným kompozitem je umístěn do vnější formy a pak je nahuštěn silou materiálu do svého žádoucího tvaru. Lisované shafty jsou dokončeny a připojeny k čepeli stejným způsobem jako hliníkové shafty. Pro montáž čepele je jeden konec shaftu ponechán otevřený. (5)

Čepele

Čepel hole je připojena poté, co je již shaft spečený a vytvarovaný. Čepele jsou vytvořeny podobným způsobem jako shafty, pomocí procesu pečení - desky se vytvářejí pomocí dřevěných forem, které tvoří čepel se správnými křivkami a velikostí, na základě konkrétního modelu. Čepel je připojena k shaftu pomocí pryskyřice, která se peče do vytvrzení. Konec čepele je potažen horkým lepidlem a dva kusy hokejky jsou spojeny a nechají se zaschnout.

Dokončení

Poté co jsou čepel a shaft zformovány do hokejky, je povrch vyhlazen do hladka. Čepel se pak ponoří do polyuretanu, aby se vytvořila ochranná vrstva pro zvýšenou odolnost a pevnost. Po zaschnutí nátěrů jsou hokejky dotvářeny dle požadavků – úprava barev a možnosti personalizace. Gumová zástrčka je vložena na druhý konec shaftu pro uchopení a bezpečnost.(6)

2.3 Obecné trendy hokejek pro lední hokej

Hokejka se skládá z rovného dlouhého kusu – tělo hokejky a zakřivené části – čepel hokejky. Většina hráčů si obaluje textilní páskou horní část těla hokejky pro lepší uchopení a čepel pro lepší vedení puku. (4)



Obrázek č. 5 Části hokejky

Zdroj: Anderson, R.L.: Experimental Characterization of Ice Hockey Sticks and Pucks, [online].
Master Thesis, Washington State University, 2008.

2.4 Vybrané vlastnosti hokejek

Dřevěné hokejky jsou postupně nahrazovány kompozitovými. Důvody jsou:

- nižší hmotnost hokejky při použití kompozitových vláken (průměrně ca 450 g),
- kompozitní materiál umožňuje větší pružnost hole. To má za následek, že když dojde při střele ke kontaktu hole s ledem, dochází k prohnutí, tím se v ní nakumuluje větší energie. Po uvolnění energie dojde k vystřelení puku, který má větší razanci a rychlost.

Protože dřevěné hole měli tužší „shaft“, který se méně prohýbal, docházelo častěji ke zlomení spodní části „čepeli“. Naopak u kompozitových hokejek, kde se více využívá pro pružení hole k větší razanci střeli, dochází častěji ke zlomení „shaftu“.

V porovnání lámavosti dřevěných hokejek, se nedá říci, že by se kompozitové hokejky lámaly méně než dřevěné. Kompozitní hokejky mají větší pevnost a pružnost při střelách, ale v hokeji dochází ve velkých rychlostech ke střetům, jak s protihráči, tak např. s mantinelem. Při těchto střetech může dojít k narušení struktury kompozitu a při následné střele k jeho zlomení.(5)

První celokompozitové hokejky nebyli o moc lehčí než hokejky dřevěné a hráč neměl takový cit při ovládání puku. Také se dost lámali a jejich cena byla vysoká. Další vývoj kompozitních materiálů vedl k tomu, že se výroba kompozitních hokejek výrazně zlepšila a rozšířila, dnes používané kompozitové hokejky mají výrazně lepší vlastnosti oproti dřevěným. Kompozitové hokejky jsou nyní nejlehčí na trhu a nedochází u nich postupem času ke snížení pružnosti a tuhosti jako u dřevěných.

2.5 Druhy kompozitových hokejek

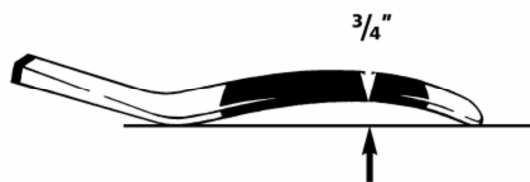
Hokejka se skládá z 2 hlavních částí. Část, kterou hráč drží v ruce, nazýváme tělo (angl. Shaft) a část, kterou hráč pohybuje pukem po ledové ploše, se nazývá čepel (angl. Blade). V dnešní době se na trhu vyskytují 3 druhy kompozitních hokejek dvoudílné, jednodílné a jednodílné z jednoho kusu. Dvoudílné mají duté tělo, do kterého se vkládá čepel, výhodou je, že pokud dojde ke zlomení čepele, tak ji uživatel může jednoduše vyměnit. U jednodílných hokejek se vyrábí zvlášť tělo, ke kterému je později na pevně připevněna čepel. Nejnovější variantou jsou kompozitní hokejky kompozitové z jednoho kusu, kde celým procesem výroby prochází hokejka celá v jednom kuse, tímto způsobem výroby se snížila hmotnost hokejky a tuhost v místě spoje s čepelí a tělesem.

Kompozitové hokejky se vyznačují tzv. gripem, to je protiskluzový povlak nanesený na „shaft“ hole. Tento povrch má mírně lepkavý charakter, což má za následek, že hokejka nesklouzává z ruky a zvyšuje se cit při jejím držení. Materiál těchto povlaků se liší od jednotlivých výrobců.(6)

Pevnost a tvárnost kompozitů umožňuje výrobu různých druhů těl a čepelí aniž by to mělo nějaký dopad na trvanlivost hokejky. Lepší kontrola při výrobě umožnila, změnu tvaru hokejky a to zúžení těla směrem k čepeli, to vedlo k dalšímu snížení hmotnosti a zvýšilo se množství energie, které se převádí z hokejky na puk. Tvar průřezu tělesa se může ve výrobě také upravovat a hráč si může na trhu vybrat hokejku, která je mu do ruky nejvhodnější.

Geometrie průřezu těla hokejky, může být ve výrobě kompozitových hokejek také měněn, z původního obdélníkové tvoru se zkosenými hranami, se přechází k většímu zaoblování hran a některé mají i vyduté plochy.

Nejprestižnější hokejová soutěž na světě Americká National hockey league (NHL), vytvořila normy a předpisy pro rozměry hokejek na lední hokej. Délka od paty čepele ke konci těla nesmí být větší než 160cm (32“). Čepel nesmí být od paty ke špičce delší než 31,75cm (12,5“). Čepel musí mít zaoblené hrany a na výšku měřit mezi 5 až 7,62 cm. Dalším předpisem je omezení zahnutí čepele. Pokud položíme čepel na vodorovnou desku (viz. Obrázek), nesmí být mezera mezi vodorovnou podložkou a jakýmkoli místem na čepeli větší než 1,9cm (3/4“). V normě není uvedeno nic, co by omezovalo, z jakého materiálu se musí hokejky vyrábět.(4)



Obrázek č. 6 Měření zakřivení čepele

Zdroj: Anderson, R.L.: Experimental Characterization of Ice Hockey Sticks and Pucks, [online].
Master Thesis, Washington State University, 2008.

2.6 Parametry hokejek

Základní parametry hokeje:

- Hmotnost
- Zahnutí čepele
- Míra přenosu vibrací
- Tuhost

Při výběru hokejky se hráč soustředí na tyto vlastnosti, hmotnost, jak mu hokejka sedí v ruce, zahnutí čepele a tuhost těla. Existuje velké množství různých čepelí, s různými druhy zahnutí a hráč má možnost si v širokém sortimentu vybrat tu, která mu pro jeho styl hry vyhovuje nejvíce.

Při vedení puku hokejkou po ledě, jsou žádoucí vibrace přenášeny z čepele do těla hokejky a následně do ruky hráče. To dává hráči větší kontrolu nad pukem a lepší představu o jeho umístění, aniž by se musel dívat dolů na čepel. Vnímání vibrací je dáno kombinací vibrací a lidské reakce. Ručně přenášené vibrace se pohybují v rozmezí 8 – 1000Hz. Nad 1000Hz se už lidská reakce na ručně přenášené vibrace zmenšuje.

Těla hokejek se hodnotí podle tuhosti (angl. flex), tato hodnota bývá uvedena v librách na tělese hokejky, je to množství síly vynaložené k ohnutí tělesa o 2,54cm (1"). Hokejky pro dospělé se nejčastěji pohybují v tuhostech od 75-115. Během střeli nebo přihrávky je při styku s ledem hokejka prohnuta a následně se energie vzniklá prohnutím převede na puk. Každému hráči může vyhovovat jiná tvrdost těla v závislosti na hmotnosti hráče, stylu bruslení, stylu střelení atd.

Tento faktor je důležitý, protože pokud si hráč vybere příliš tvrdou hokejku, tak ho můžou z její používání bolet ruce a pokud zvolí příliš měkkou, je velká pravděpodobnost, že dojde k jejímu zlomení. Výběr vhodné tvrdosti záleží na hmotnosti uživatele a jeho herních zkušenostech. Při výrobě se tvrdost hole ovlivňuje matricí a vhodným poměrem druhů vláken obsažených v kompozitu.

3. Testy prováděné na hokejových holích v minulosti

Mezi testy zkoumající vlastnosti kompozitových hokejek, které již byly provedeny, patří následující studie Washington State University z roku 2008. Tato studie popisuje experimentální metody, jejichž cílem je charakterizovat vlastnosti hokejových holí při rychlostech používaných při hře. Hole byly charakterizovány z hlediska vibračních frekvencí a tvaru průřezu.

Hokejka je základním vybavením hráče a závisí na ní z velké části jeho výkon. Hůl se používá především pro manévrování a střílení puku.

Profesionální hokejisté mohou během hry dosáhnout rychlosti puku v rozmezí 120 až 177 km/h. Hráči používají několik druhů střel na branku, nejrychlejší je tzv. golf. Při golfové střele se hůl dotýká ledu těsně před pukem a shaft je vychýlen. Jak se hůl pohybuje dopředu a pohybuje se s pukem, shaft působí jako pružina a odvrací se zpět, čímž ještě přidává holi na rychlosti. Místo shaftu, které se nejvíce odchyluje během nápřahu, se nazývá odrazový bod, který se nachází v blízkosti nebo pod dolní rukou.

Dřívější studie golfových střel se zabývaly technickými aspekty střílení bez ohledu na typ holi. V roce 1978 Sim a Chao analyzovali vysokorychlostní videa k provedení biomechanické analýzy hokejových střel a rychlostí puku až 144 km/h hokejových hráčů středních škol a až 193 km/h pro vysokoškoláky a profesionální hráče.

Studie uvádí, že rychlost hole v golfové střele je závislá více na hráči než na tuhosti holi. Silnější hráči, kteří vytvářejí větší rychlost hole, také dosahují většího průhybu shaftu.

Tvrdost, pružnost a odolnost proti opotřebení jsou klíčové vlastnosti hokejových holí. Tvrdá dřeva jako je jilm, bříza nebo osika byla dobré materiály pro první hokejové hole. Dřevěné hole nabízejí dobrý cit pro puk, ale patří mezi nejtěžší hokejové hole a mají tendenci degradovat nebo se změkčovat po opakovaném používání.

Poslední generace hokejových holí jsou vyrobeny z kompozitních materiálů, hlavně kombinace laminátu, kevlaru nebo karbonových vláken v polymerní pryskyřici. Kompozitní hole jsou nejlehčí na trhu. Vlastnosti jako hmotnost, tuhost, tlumení vibrací a geometrie mohou být velmi dobře ovladatelné během výroby. Kompozitové hokejky mohou být vyráběny více konzistentní a opotřebují se nebo se změkčují méně než dřeva. Vysoká pevnost kompozitních materiálů umožňuje vyšší poddajnost hole.

Tento vývoj ve výrobě kompozitových hokejek vedl ke změnám v konstrukci a designu hokejek. Průřez shaftu může být navržen jako konkávní, s rovnou stěnou nebo s konvexním tvarem. Shafty také mohou být zúžené, aby lépe kontrolovaly místo odrazového bodu na holi. Vliv těchto změn na výkon hole není zatím zdokumentován a přímý vztah mezi střílením a dynamikou hole nebyl stanoven.

Vibrace holí se také stala mnohem důležitější se zavedením kompozitních materiálů, u kterých si hráči často stěžují na špatný cit pro puk ve srovnání s dřevem.

Výrobci používají nové materiály s geometrickými vlastnostmi holí, které by měly dovolovat, aby se puk uvolňoval z holí rychleji, ale nebyl proveden žádný nezávislý výzkum, který by výrobu těchto holí tímto způsobem vyvrátil nebo potvrdil. Byla vyvinuta zkušební zařízení pro měření odezvy puku a hole při rychlostech jako při hře.

3.1 Modální analýza

Princip modální zkoušky spočívá v tom, že měřenou strukturu vybudíme silou, jejíž průběh měříme pomocí snímače síly a současně snímáme vibrační odezvu na tuto silu, zpravidla s použitím akcelerometru. Provedeme-li takováto měření v dostatečném počtu míst na struktuře, získáme tzv. odezvový model systému. Odezvový model je tvořen maticí tzv. frekvenčních odezvových funkcí, což jsou frekvenčně závislé funkce popisující odezvu systému na známé buzení.

Účinek vibrací holí byl analyzován pomocí modální analýzy. Byly odvozeny podmínky pro porovnání výkonu holí za reálných herních podmínek. Modální analýza byla provedena na různých rovných dřevěných shaftech, rovných kompozitních shaftech a kónických kompozitových shaftech. Výsledky jsou shrnuty v tabulce 1. Předpona W (dřevěné) nebo C (kompozitové).

Číslo hokejky	Materiál	Geometrie
W1	Dřevo	Rovný shaft
W2	Dřevo	Rovný shaft
W3	Dřevo	Rovný shaft
W4	dřevo s kompozitovou čepelí	Rovný shaft
W5	Dřevo	Zúžený shaft
W6	dřevo s kompozitovou čepelí	Zúžený shaft
C1	Kompozit	Rovný shaft
C2	Kompozit	Rovný shaft
C3	Kompozit	Zúžený shaft – málo
C4	Kompozit	Zúžený shaft - středně
C5	Kompozit	Zúžený shaft - středně
C6	Kompozit	Zúžený shaft - středně/velmi
C7	Kompozit	Zúžený shaft –velmi
C8	Kompozit	Elitní kompozit
C9	Kompozit	Elitní kompozit
C10	Kompozit	Elitní kompozit
C11	Kompozit	Elitní kompozit

Tabulka č. 2 Seznam testovaných hokejek

zdroj: Anderson, R.L.: Experimental Characterization of Ice Hockey Sticks and Pucks, [online].
Master Thesis, Washington State University, 2008.

3.1.1 Přenos vibrací z hole na hráče

Při této modální zkoušce bylo pevné silové pole nahrazeno modelem výkyvné hole při nárazu puku do čepelě.(viz obr. 3). Hůl byla otočná kolem kolmé osy k délce hole, v délce 35 palců od spodní části

shaftu. Pro aktuální střelu golfem byl okamžitý střed otáčení hole mnohem blíže k horní části shaftu. Hokejka je poměrně pružná, a proto přesný střed otáčení nebo otočná vzdálenost, PD, nebyla důležitá při určování dynamického chování hokejky.

Při skutečné střele golfem je výsledná rychlost puku dána kombinací pružnosti hokejky a rychlostí, kterou je hokejka vedena. Tuhost shaftu má malý vliv na rychlost puku, rychlost a deformace hole se tedy zvyšují s hráčovými schopnostmi. Tak může být napřahování shaftem považováno za konstantní nárůst rychlosti hole (nezávisle na tuhosti shaftu), které může být přičteno rychlosti hokejky, jakou je vedena.

Byly porovnány dřevěné hokejky (W2), rovného kompozitního shaftu (C2), středně zúženého kompozitního shaftu (C9) a v horní linii zúženého kompozitu (C3). Každá hůl byla testována na sedmi různých místech podél čepele. Tato místa nárazu byla ve spodním palci (2.54cm) čepele v jednopalcových horizontálních intervalech, počínaje patou čepele. Výsledné hodnoty jsou průměry ze šesti střel na každém místě nárazu.

Pro testování byly puky vystřeleny na určená místa na čepel natočené hole. Lehké brány měří příchozí rychlost puku a potenciometr měří úhlovou rychlost hole po nárazu. K ověření každého dopadu byly použity vysokorychlostní video a sprejový prášek na ostří. Jako platný dopad byl definován takový dopad, který měl příchozí rychlost 50 ± 1 mph, neviklal se nebo točil a kruhový okraj narazil na spodní palec čepele. Polyethylenový sabot podporuje puk při vystřelení, zajišťuje, aby byla trajektorie puku rovná bez točení.

Kolizní účinnost, e_a , z účinku puku a hole může být stanovena:

Rovnice č.3

$$e_a = \frac{v_p'}{v_p} \quad (3)$$

Kolizní účinnost může být použita k popisu rychlosti puku za herních podmínek jako:

Rovnice č. 4

$$PS = v_p e_a + v_s (1 + e_a) \quad (4)$$

kde v_s je rychlost náprahu hole. Pro případ napřahání holí s účinkem na nehybný puk, se rovnice (4) redukuje na:

Rovnice č. 5

$$PS = v_z(1 + e_a) \quad (5)$$

Rychlost náprahu hole byla vypočtena v mílích za hodinu z nominální hodnoty průměrné rychlosti náprahu, v tomto případě 60 mph pro hůl s $I = 10.000$ oz in² na 35 palcovém místě nárazu. Moment setrvačnosti hole kolem osy otáčení byl nalezen analogickým způsobem jaký je popsán v normě ASTM F2398 [11]. Bylo prokázáno, že rychlost závisí na setrvačnosti v různých sportech. To bylo změřeno podle místa nárazu pomocí Q (měřeno od osy otáčení) a momentu setrvačnosti hole I jako:

Rovnice č. 6

$$v_z = 60 \left(\frac{Q}{35} \right) \left(\frac{10,000}{I} \right)^{1/4} \quad (6)$$

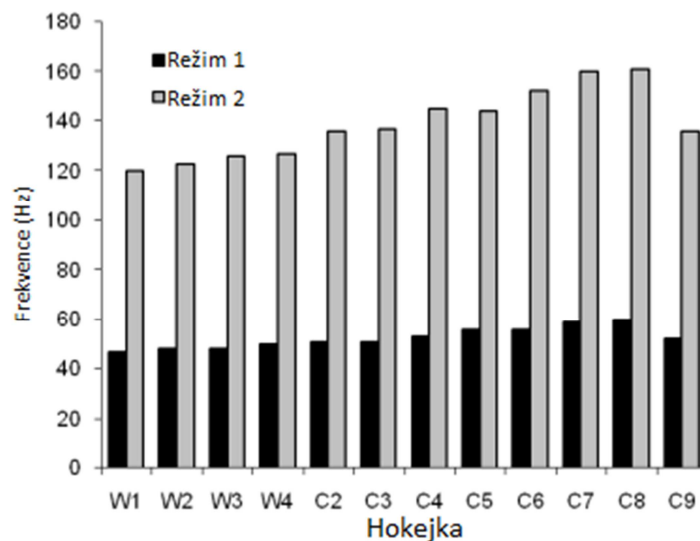
Zkouška byla provedena na posuvném kladivu (roving hammer) s účinkovým kladivem (PCB Piezotronics, Model # 350B23, Depew, NY). 0.5 g jednoosý akcelerometr byl zafixován v polovině horní části shaftu (PCB Piezotronics, Model # 352C22, Depew, NY). Shaft hokejky byl zkoušen v místech s intervaly jednoho palce po celé délce horní hole (obr. č. 7). Imaginární část FRF byla zobrazeny podél délky hokejky získat vodopád děj režimu tvarů.



Obrázek č. 7 Modální testování

zdroj: Anderson, R.L.: Experimental Characterization of Ice Hockey Sticks and Pucks, [online].
Master Thesis, Washington State University, 2008.

Frekvence při prvním ohýbání při jedné frekvenci byly přibližně stejné u všech holí. Nejméně ohebná byla hůl W1 při 47 Hz a nejvíce hůl C8 při 60 Hz. Ohýbání při dvou frekvencích ukázalo větší rozpětí mezi 116 - 161 Hz. Frekvence ohýbání jsou shrnuty na obr. 8.



Obrázek č. 8 Výsledky testů

zdroj: Anderson, R.L.: Experimental Characterization of Ice Hockey Sticks and Pucks, [online].
Master Thesis, Washington State University, 2008.

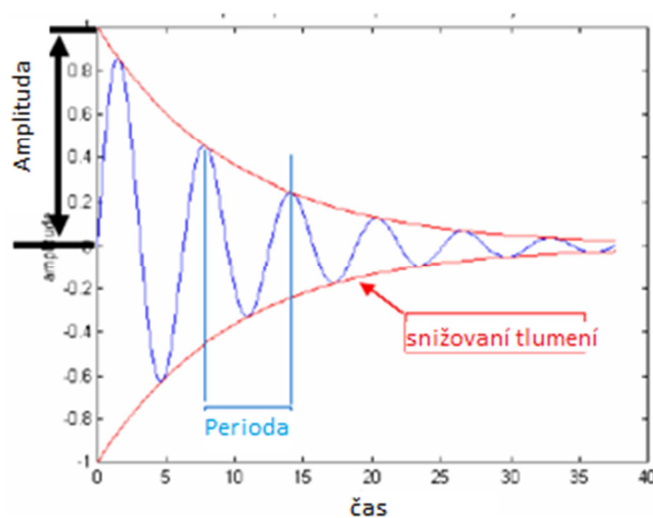
Je obtížné nalézt přibližné hodnoty frekvencí, které by odpovídaly konkrétním holím. Dřevěné hole mají nejnižší frekvence a poskytují nejlepší cit pro puk. Jsou následovány vysoce zúženými kompozitními shafty, které poskytují lepší cit pro puk než středně a málo zúžené kompozitní hole. Frekvence jsou si relativně blízko, nicméně je obtížné vyčíslit přímou korelaci mezi frekvencemi v prvním ohýbacím režimu a pocitu hráče.

Hokejky byly porovnány prostřednictvím frekvencí v jejich prvním a druhém režimu ohýbání. Silná korelace mezi naměřenými vibračními odezvami a hráčovým vnímáním nebyla pozorována. Bylo navrženo opatření k porovnání výkonu holí na základě idealizované rychlosti puku. Pomocí tohoto opatření byl zhodnocen výkon kompozitových holí signifikantně vyšší než dřevěných holí.

3.1.2 Tlumení

Tlumení znamená, jak rychle se vibrace rozkládají ve struktuře nebo jinak řečeno jaká je výše ztráty energie způsobena vibrací. Tento koncept je znázorněn na obrázku č. 9, který ukazuje tlumené odezvy vibrujícího systému.

Cílem tohoto testu bylo získat určitý vhled do problematiky vnímání vibrací hráčem.



Obrázek č. 9 Odezva tlumení vibračního systému

zdroj: Anderson, R.L.: Experimental Characterization of Ice Hockey Sticks and Pucks, [online].

Master Thesis, Washington State University, 2008.

Tlumení je závislé jak na tuhosti konstrukce, tak na amplitudě vibračního vstupu. Z tohoto důvodu bylo třeba testovat tlumení metodou použití vstupního impulsu se stejnou amplitudou. Bylo použité účinné kladivo jako kyvadlo umístěné před hokejky. Kladivo bylo staženo zpět do stejné vzdálenosti pro každý dopad a puštěno k dopadu na hůl. Byl použit software LabView 7.1 k analýze vstupů a reakcí a ke znázornění křivky odezvy.

Akcelerometr 85 byl umístěn ve vzdálenosti 28,5 palců od paty čepele a hůl byla zkoušena ve vzdálenosti 24 palců od paty čepele. Nastavení testu je znázorněno na obrázku č. 10.



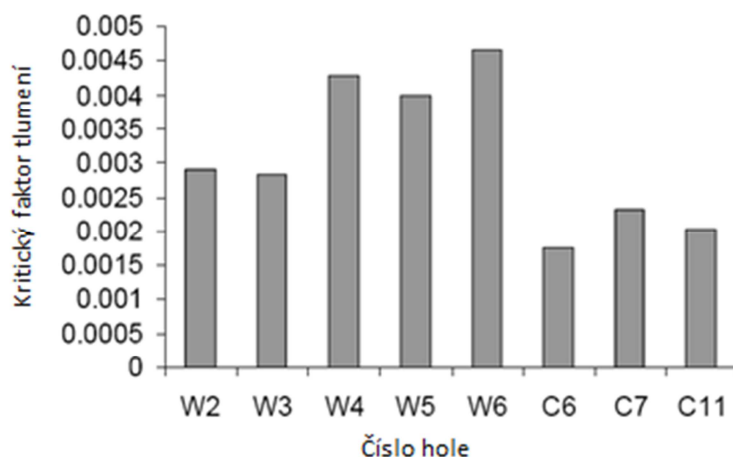
Obrázek č. 10 Aparát testu tlumení

zdroj: Anderson, R.L.: Experimental Characterization of Ice Hockey Sticks and Pucks, [online].

Master Thesis, Washington State University, 2008.

Výsledky tlumicího efektu byly velmi nejednoznačné. Kritické faktory tlumení byly nalezeny pro 5 dřevěných holí a 3 kompozitové hokejky. Výsledky jsou uvedeny na obrázku č. 11. U ostatních hokejek došlo v procesu vytváření křivky pravděpodobně k chybě, což vedlo k chybným výsledkům.

Tlumení závisí na tuhosti hole, která byla pro každou hůl v této studii jiná. K úspěšnému určení tlumení každé hole je potřeba měřit ohybovou tuhost pomocí programu LabView. Pro několik holí, které byly testovány s pevnou hodnotou ohybové tuhosti, všechny dřevěné hole měly vyšší tlumicí faktory než kompozitové. Tato studie byla omezena na malý počet hokejek, nicméně byl demonstrován efekt útlumu na to, jak hráč vnímá puk prostřednictvím hokejky.



Obrázek č. 11 Kritický faktor tlumení pro 8 hokejek

zdroj: Anderson, R.L.: Experimental Characterization of Ice Hockey Sticks and Pucks, [online].
Master Thesis, Washington State University, 2008.

Závěrem lze shrnout, že modální analýza odhalila pouze malý rozdíl v prvních dvou ohybových režimech pro kompozitní nebo dřevěné hole, zatímco testování vysokorychlostních střel ukázalo rozdíl výkonu ve výši 21% pro různé typy holí. Výsledky naznačují, že moderní materiály používané na výrobu hokejových holí mají významný pozitivní vliv na hru. (6)

4. Testování opotřebení kompozitních hokejek

Mezi nejdůležitější vlastnosti hokejové hole, které ovlivňují parametry a tím kvalitu hokejky, patří pružnost a pevnost a přenos vibrací. Přenos vibrací, který je zkoumán modální analýzou, je již popsán ve 3. kapitole. V této kapitole jsou popsány provedené experimenty, které zkoumají pružnost a pevnost materiálu. Tyto vlastnosti jsou zjišťovány zkouškou 3bodým ohybem a Charpyho testem. Zkouškou 3bodým ohybem bude zjištěno, jaká je pružnost hole. Testem Charpyho kladivem bude simulována energie působící na hokejku a získanými daty bude zjištěno, při jaké energii dochází k porušení vzorku, tedy ke zlomení hokejky. Testy byly prováděny v laboratořích TUL.

Byly testovány vzorky hokejových holí, které byly odebrány cca ve výšce 2/3. Vzorky byly nařezány na předepsané rozměry, aby mohly být testovány na vybraných strojích.

Následující tabulka obsahuje popis testovaných vzorků. Od každé značky hokejky byly testovány celkem 3 hokejky s různou dobou opotřebení, nová, používána 3 dny a 6 dní. Všechny hokejky byly používány denně cca 2-3 hodiny. Testováním těchto vzorků bude možné sledovat snižování pružnosti a pevnosti hokejek vlivem opotřebení.

Vzorek	značka	stáří (dny)
AN	Warrior Widow	nová
A1		3
A2		6
BN	Warrior Diablo	nová
B1		3
B2		6
CN	CCM Midngiht	nová
C1		3
C2		6

Tabulka č. 3 Popis testovaných vzorků

4.1 Základní parametry zkoušených vzorků

Měrná hmotnost

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{a \cdot b \cdot h} \quad [\text{kg/m}^3] \quad \text{nebo} \quad [\text{g/cm}^3]$$

m [kg] ... hmotnost nebo [g]

a [m] ... šířka vzorku nebo [cm]

b [m] ... délka vzorku nebo [cm]

h [m] ... tloušťka vzorku nebo [cm]

Měrná hmotnost vzorek A: 1,10 [g/cm³]

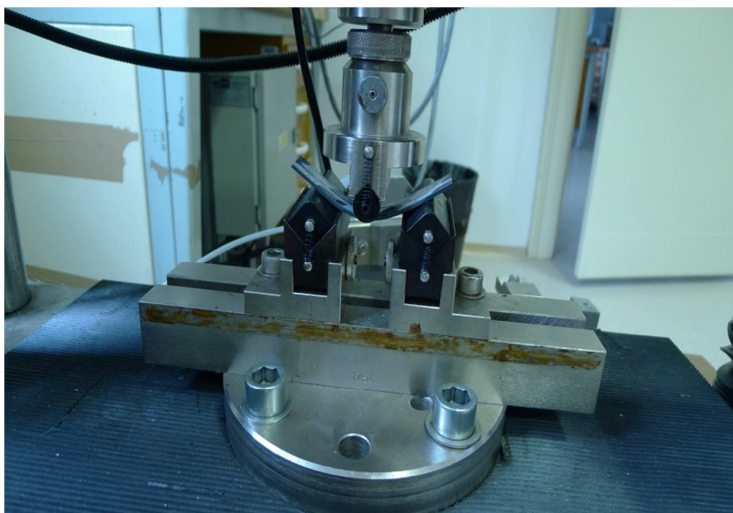
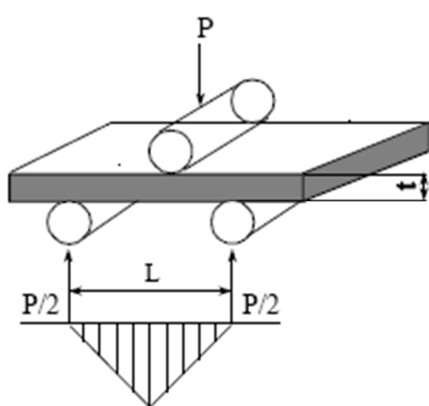
Měrná hmotnost vzorek B: 1,43 [g/cm³]

Měrná hmotnost vzorek C: 1,10 [g/cm³]

4.2 Zkouška 3bodým ohybem pomocí dynamometru

Materiály, jež jsou v praxi namáhány na ohyb, nebo jsou tak těžké, že se svou vlastní vahou dokážou prohnout, je zapotřebí znát ještě před jejich konečnou aplikací v praxi.

K určení míry průhybu u takto náchylných materiálů je vhodná zkouška tříbodovým ohybem, jež dokáže do jisté míry simulovat namáhání materiálu a tím určení, zda-li je materiál vhodný pro konečnou aplikaci.



Obrázky č. 12 a 13 Schematické znázornění 3bodého ohybu a reálný pohled na průhyb vzorku

4.2.1 Postup zkoušky

Zkouška 3PB ohybem byla prováděna na trhacím přístroji TIRA TEST 2300 od firmy LABORTECH, ke kterému bylo připevněno pomocné zařízení potřebné k 3PB ohybu. Jedná se o přístroj, jehož výhodou je připojení k počítači, který ihned při provádění zkoušky zaznamenává a vyhodnocuje získaná data.

Při zkoušce tříbodovým ohybem je zkušební vzorek podepřen jako nosník dvěma podpěrami a prohýbán působením konstantní rychlostí trnem, působícím uprostřed podpěr tak dlouho, dokud hloubka průhybu nedosáhne požadované velikosti.

Ohybová zkouška také pomáhá určit modul pružnosti E u materiálů, u kterých nelze modul E zjistit z tahových či tlakových zkoušek s dostatečnou přesností.

Způsob přípravy zkušebních vzorků, jejich rozměry, rychlost zatěžování, rozměry podpěrných i zatěžovacích trnů a další náležitosti ohybových zkoušek jsou zaznamenány v příslušných normách.

Po nastavení počátečních podmínek přístroje bylo možno testovat vzorky o velikosti 20 x 100 mm. Na připojeném počítači se softwarem Lab. Test. verze 3.16.1962, který ihned zaznamenával naměřené hodnoty bylo možné sledovat také samotný průběh zkoušky v grafickém znázornění.

Kromě počátečních podmínek bylo nutno ke každému novému vzorku doplnit údaje o jeho tloušťce, jež je zapotřebí k výpočtům modulu pružnosti ze vztahu 8.

4.2.2 Výpočty pro vyjádření výsledků

- Pevnost v ohybu – maximální napětí v ohybu, které vzorek snese během zkoušky.
- Napětí v ohybu – napětí vnějšího povrchu vzorku uprostřed rozpětí podpěr, počítá se dle vztahu:

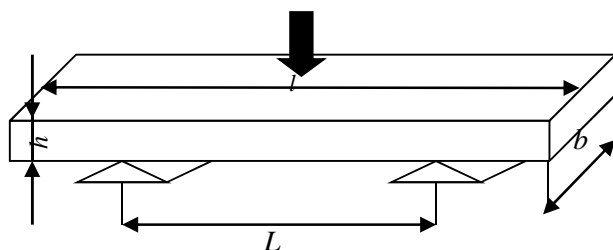
$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \quad (7)$$

kde F [N] je zatěžující síla, L [mm] je rozpětí podpěr, b [mm] je šířka zkoušeného vzorku, h [mm] je tloušťka vzorku.

- Modul pružnosti v ohybu E – vyjádřený v MPa, získáme z oblasti namáhání, v níž je lineární závislost průhybu na zatížení, přičemž záleží na geometrii vzorku.

$$E = \frac{Fl^3}{4Xbh^3} \quad (8)$$

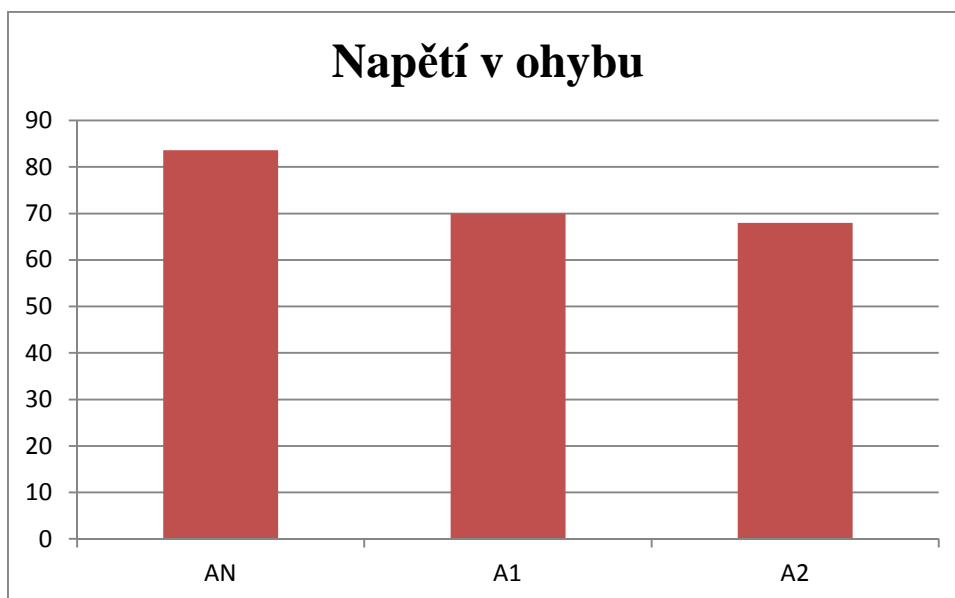
Kde X [mm] je průhyb, F [N] je zatěžující síla, h [mm] je tloušťka tělesa, b [mm] je šířka tělesa, l [mm] je délka vzorku.



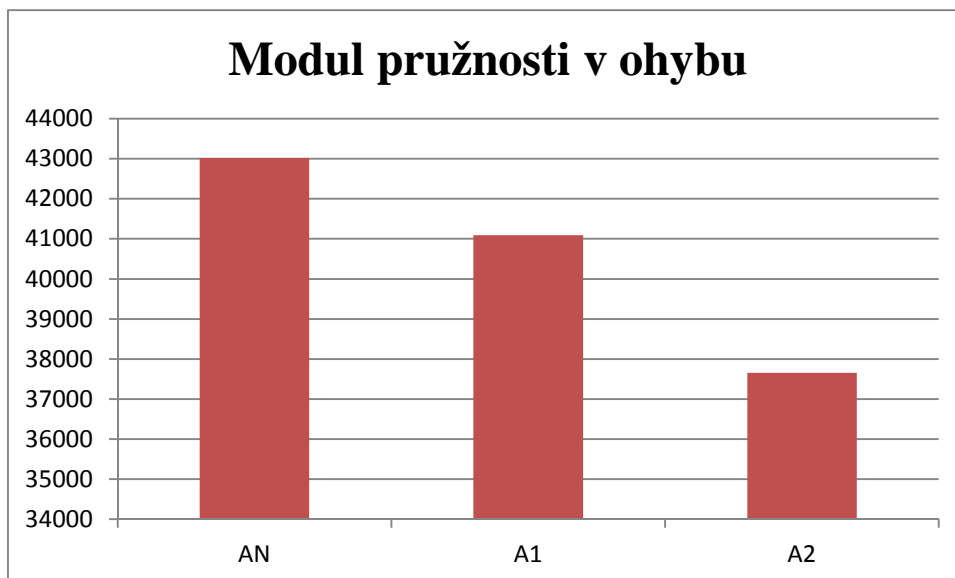
Obrázek č. 14 Měřené rozměry vzorku

4.2.3 Výsledky zkoušky 3bodým ohybem

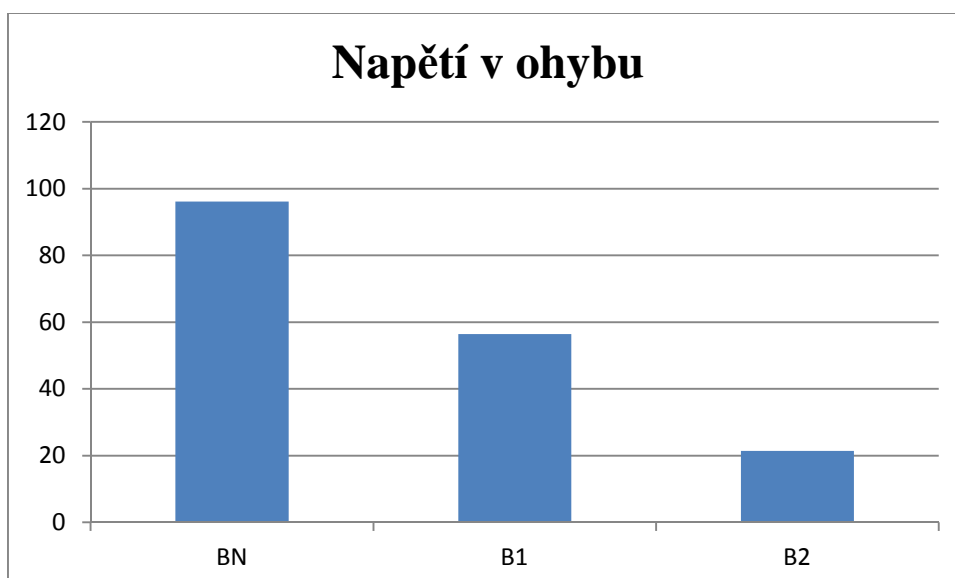
Při měření bylo testováno 4-7 vzorků od každé hokejky. Pro účely sestavení grafů napětí v ohybu a modulu pružnosti v ohybu byl z naměřených hodnot pro každý vzorek vypočítán aritmetický průměr.



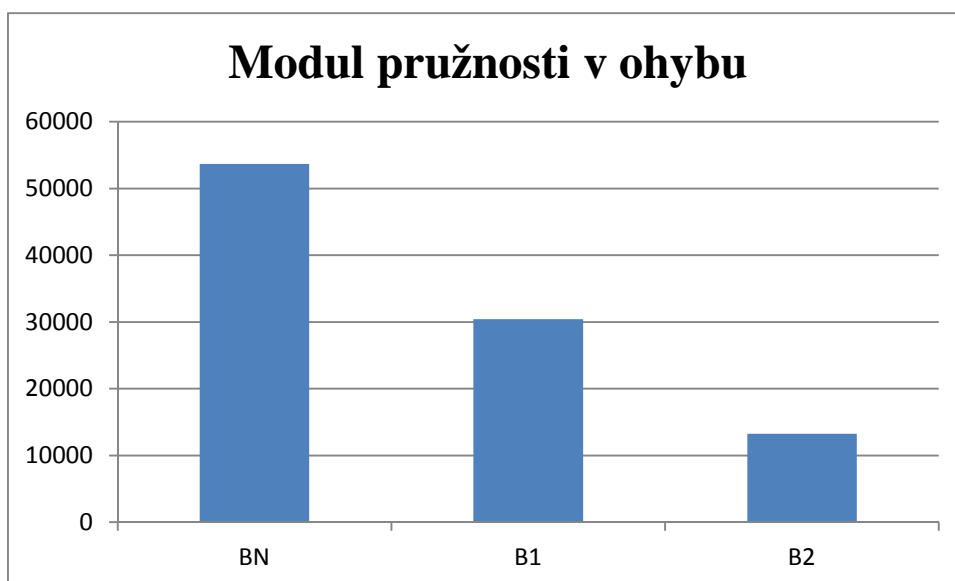
Graf č. 1 Výsledky napětí v ohybu hokejky A



Graf č. 2 Výsledky modulu pružnosti v ohybu hokejky A



Graf č. 3 Výsledky napětí v ohybu hokejky B



Graf č. 4 Výsledky modulu pružnosti v ohybu hokejky B

Na každém grafu jsou hodnoty vždy pro novou, 3 dny a 6 dní používanou hokejku. Pružnost obou hokejek používáním klesá, ale různou mírou. U hokejky A se napětí v ohybu po 3 dnech používání snížilo o 16,27% a po 6 dnech o 18,65%. U hokejky B kleslo napětí v ohybu po 3 dnech o 41,30% a po 6 77,73%. Modul napětí v ohybu klesl u hokejky A po 3 dnech pouze o 4,47% a po 6 dnech o 12,46%.

Tento test prokázal, že pružnost opotřebením ztrácí vzorky hokejky B rychleji než vzorky hokejky A. Pro provedení testu hokejky C nebylo k dispozici dostatečné množství vhodných vzorků.

4.3 Charpyho test

Charpyho test se prováděl na přístroji LabTest CHK 50J.

Zkouška je vhodná jako simulace nárazů různých charakterů. Například pro materiály používané na stavby lodí, letadel, apod. Zkouškou se zjišťuje odolnost při dynamickém rázovém namáhání. Test slouží ke zjištění, kolik práce nebo energie se spotřebuje na porušení vzorku.

4.3.1 Postup zkoušky

Princip Charpyho testu spočívá v nárazu kladivem na vzorek, kde kladivo provádí pohyb po kruhové dráze. V první fázi se zdvihne a upevní v horní (počáteční) poloze. V nejnižší poloze se na podpěrky umístí vzorek o velikosti 100 x 10 mm, na který je působeno kladivem, jenž se pohybuje volným pádem rychlostí asi 3,7 m/s. Kladivo se po výkonu vrací do počáteční polohy.

4.3.2 Výpočet energie působící při nárazu na vzorek:

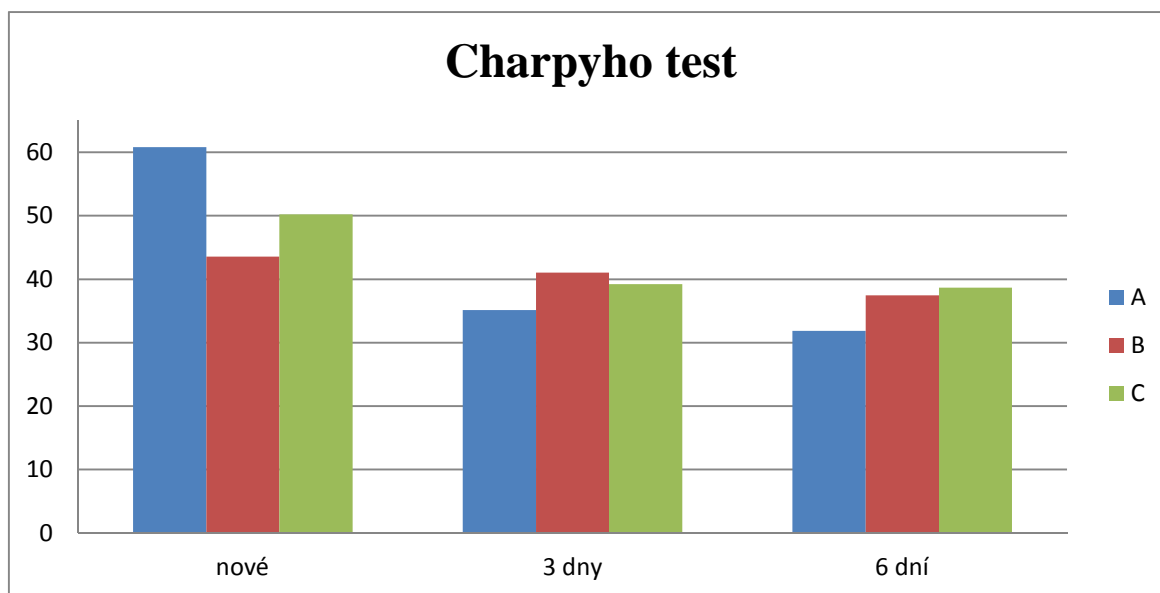
Tato energie se vypočítá podle vztahu:

$$E = E_{max} / bh \quad (9)$$

kde E [J/mm²] je energie působící při nárazu na vzorek, E_{max} [J] je konečná energie, kterou tyč naráží na vzorek, b [mm] je šířka vzorku a h [mm] je tloušťka vzorku.

4.3.3 Výsledky Charpyho testu

Stejně jako u předcházejícího testu bylo při měření testováno 2-5 vzorků od každé hokejky. Pro účely sestavení grafů byl z 5 naměřených hodnot pro každý vzorek vypočítán aritmetický průměr.



Graf č. 5 Výsledky Charpyho testu

Z grafu je čitelné, že k největší ztrátě odolnosti došlo u vzorků typu hokejky A vzhledem k vysoké odolnosti u nové hokejky A. Počáteční odolnost nové hokejky B byla značně nižší než hokejky A, ale opotřebováním ztrácí odolnost pomaleji. Odolnost hokejky A se po 3 dnech používání snížila o 42,23% a po 6 dnech o 47,62%. Hokejka B byla po 3 dnech používání méně odolná pouze o 5,78% a po 6 dnech o 14,04%.

Po provedení obou testů lze shrnout výsledky následovně. Nedá se jednoznačně určit, že je pro uživatele lepší hokejka A nebo B. Ve zkoušce 3bodým ohybem vyšla lépe hokejka A a Charpyho testem hokejka B. Z toho lze vyvozovat, že pokud hráč preferuje, aby si hokejka udržela svou pružnost

co nejdéle, je vhodnější hokejka typu A. Naopak pokud hráč vyžaduje, aby byla hokejka co nejdéle odolná proti nárazům, lze doporučit hokejku B.

Testy také dokazují, že hokejky si nedokážou udržet obě testované vlastnosti. Buď ztrácí více svou pružnost a udržují si odolnost nebo jejich odolnost klesá velmi mírně, ale jejich pružnost se používáním výrazně snižuje.

Závěr

Bakalářská práce se zabývala využitím kompozitů pro výrobu hokejových holí. Na základě rešerše literatury byly v první kapitole popsány vlastnosti, druhy a rozdělení kompozitů. V kapitole jsou uvedeny charakteristiky těchto materiálů a jejich složení.

Druhá kapitola se zaměřila na konkrétní využití kompozitů pro výrobu kompozitových hokejových holí. Kapitola uvádí postup výroby hokejek i nejdůležitější žádané vlastnosti a parametry hokejek.

Třetí a čtvrtá kapitola obsahují laboratorní měření. První ze zmíněných kapitol reprodukuje již provedený experiment testování tlumení vibrací a také pružnost hole. Byly testovány kompozitové i dřevěné hole. Výsledek testu pružnosti prokázal, že při střele kompozitovou hokejkou dosáhne puk vyšší rychlosti než při střele dřevěnou hokejkou. Co se týče tlumení vibrací, neposkytly provedené testy jednoznačné výsledky, které by dovolily označit kompozitové či dřevěné hole za lepší. Autorka experimentu ovšem konstatuje, že dřevěné hokejky poskytují lepší cit pro puk než hole kompozitové.

V laboratořích TUL jsem reálné vzorky hokejových holí A, B, C, které byly získány od hokejového klubu BK Mladá Boleslav, vystavil testům Charpyho kladivem na stroji LabTest CHK 50 J a zkoušce 3bodým ohybem na stroji TIRA TEST 2300 od firmy LABORTECH.

Při zkoušce tříbodovým ohybem byl zkušební vzorek podepřen jako nosník dvěma podpěrami, které byly od sebe vzdáleny 65 mm a prohýbán působením konstantní rychlostí trnem, působícím uprostřed podpěr tak dlouho, dokud hloubka průhybu nedosáhla požadované velikosti. Požadovaná hloubka průhybu byla nastavena na 15 mm.

Po nastavení počátečních podmínek přístroje bylo možno testovat vzorky o velikosti 20 x 100 mm. Na připojeném počítači se softwarem Lab. Test. verze 3.16.1962, který ihned zaznamenával naměřené hodnoty a tím bylo možné sledovat také samotný průběh zkoušky v grafickém znázornění.

V provedeném testu lépe obstály vzorky hokejky A. Pokles napětí v ohybu i modul pružnosti v ohybu klesal u této hokejky pomaleji, než u hokejky B. Tato hokejka je tedy vhodná pro hráče, kterým více vyhovuje, aby si hokejka udržela svou pružnost pokud možno co nejdéle.

Princip Charpyho testu spočívá v nárazu kladivem na vzorek, kde kladivo provádí pohyb po kruhové dráze. V první fázi se zdvihl a upevnil v horní (počáteční) poloze. V nejnižší poloze se na podpěrky umístil vzorek o velikosti 100 x 10 mm, na který bylo působeno kladivem, jenž se pohybovalo volným pádem rychlostí asi 3,7 m/s. Kladivo se po výkonu vracelo do počáteční polohy.

Výsledky provedeného testu ukázaly, že nový vzorek A měl největší odolnost proti rázům, ale zároveň došlo u vzorku A k největší změně vlivem opotřebení. Hokejka A měla po 6 dnech používání nejvyšší opotřebení. Vzorek B měl naopak nižší počáteční hodnotu u nové hokejky, postupem používání se

však její opotřebování snižovalo nejpomaleji. Hokejku B lze tedy doporučit hráčům, kteří nechtějí, aby jejich hokejka ztrácela používáním odolnost proti rázům a vydržela déle, než se zlomí.

Na základě provedených experimentů lze konstatovat, že není možné, aby si hokejka udržela obě zkoumané vlastnosti. Výrobce zkoumaných hokejek se tedy při výrobě zaměřil vždy na jednu z těchto vlastností.

Literatura:

1. S. MICHNA, *Technické materiály II., Fakulta výrobních technologií a managementu Univerzity J. E. Purkyně v Ústí nad Labem*, Učební text určený pro kombinované a prezenční studium, dostupné online z: http://www.stefanmichna.com/download/technicke-materialy_II/kompozitni_materialy.pdf
2. B. MEISSNER, V. ZILVAR, *Struktura a vlastnosti polymerních materiálů*, Studijní materiál Vysoké školy chemicko-technologické v Praze
3. <http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>
4. LONG, A.C.: *Design and manufacture of textile composites*, Woodhead Publishing Ltd., Cambridge England, 2005
5. <http://www.madehow.com/Volume-4/Hockey-Stick.html#ixzz2T6Wv7f96>
6. ANDERSON, R.L.: *Experimental Characterization of Ice Hockey Sticks and Pucks*, [online]. Master Thesis, Washington State University, 2008. Dostupné z WWW: http://www.dissertations.wsu.edu/Thesis/Spring2008/R_Anderson_042308.pdf.
7. <http://www.livestrong.com/article/393216-how-composite-hockey-sticks-are-made/#ixzz2T6XLRt9P>
8. <http://www.opravyhokejek.cz/news/co-jsou-to-kompozitove-materialy/>
9. <http://www.nalede.cz/jak-vybrat-hokejku>
10. J.VRBKA, *Mechanika kompozitů*, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2008
11. SPENCER B.E., (1998), *Composites in the sporting goods industry*, in Peters S. T., Handbook of Composites, London, Chapman & Hall, 1044–1052.
12. JACOBY M., *Olympic science*, CENEAR, 2002 80(5) 29–32.

Přílohy

Zkouška 3bodým ohybem

Naměřené hodnoty AN

STAT	Amax	Fmax	Amax	Rmo	Fmax	E	E	X	Fx	Fm	Āx
	mm	N	mm	MPa	N	N/mm2	N/mm2	mm	N	N	kPa
Počet zkoušek	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Průměrná hodnota zkoušek	10,41 6	429,5	10,42	674,51	429,5	27224,76	21019,73	2	60,37	429,5	97665,03
Směrodatná odchylka zkoušek	5,34	251,09	5,34	425,32	251,09	16231,17	14411,8	0	50,74	251,09	82088,82
Variační koeficient zkoušek	51,26 8	58,461	51,27	63,06	58,46	59,62	68,56	0	84,05	58,46	84,05
Minimální hodnota zkoušek	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
Maximální hodnota zkoušek	14,9	662,99	14,9	1072,53	662,99	43084,72	34037,92	2	125,33	662,99	202744,9
Nejistota typu A zkoušek	5,34	251,09	5,34	425,32	251,09	16231,17	14411,8	0	50,74	251,09	82088,82

Zkouška	Amax	Fmax	Amax	Rmo	Fmax	E	E	X	Fx	Fm	Āx
	mm	N	mm	MPa	N	N/mm2	N/mm2	mm	N	N	kPa
6	11,28	558,14	11,28	902,91	558,14	36254,42	29968,16	2	86,04	558,14	139195,3
5	11,797	662,99	11,8	1072,53	662,99	43084,72	34037,92	2	125,33	662,99	202744,9
4	10,754	582,24	10,75	941,89	582,24	35935,33	32792,46	2	86,68	582,24	140226,7
3	14,9	258,91	14,9	297,09	258,91	15469,75	6671,43	2	0	258,91	0
2	13,764	514,71	13,76	832,66	514,71	32604,3	22648,43	2	64,18	514,71	103823,3
1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0

Naměřené hodnoty A1

STAT	Amax	Fmax	Amax	Rmo	Fmax	E	E	X	Fx	Fm	Āx
	mm	N	mm	MPa	N	N/mm2	N/mm2	mm	N	N	kPa
Počet zkoušek	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Průměrná hodnota zkoušek	14,993	339,92	14,99	522624,7	339,92	1204695552	804265536	2	56,41	339,92	88930504
Směrodatná odchylka zkoušek	0,0006	58,096	0	1044283	58,1	2409356544	1608505472	0	9,71	58,1	177701888
Variační koeficient zkoušek	0,0038	17,091	0	199,82	17,09	200	200	0	17,22	17,09	199,82
Minimální hodnota zkoušek	14,992	274,65	14,99	298,16	274,65	9278,64	6654,35	2	45,13	274,65	48994,97
Maximální hodnota zkoušek	14,994	405,73	14,99	2089049	405,73	4818730496	3217023744	2	66,26	405,73	355483328
Nejistita typu A zkoušek	0,0006	58,096	0	1044283	58,1	2409356544	1608505472	0	9,71	58,1	177701888

Zkouška	Amax	Fmax	Amax	Rmo	Fmax	E	E	X	Fx	Fm	Āx
	mm	N	mm	MPa	N	N/mm2	N/mm2	mm	N	N	kPa
4	14,992	274,65	14,99	298,16	274,65	9278,64	6654,35	2	45,13	274,65	48994,97
3	14,994	405,73	14,99	516,55	405,73	17334,86	12236,88	2	66,26	405,73	84354,39
2	14,993	311,96	14,99	634,97	311,96	25262,58	19556,07	2	51,75	311,96	105332,73
1	14,992	367,35	14,99	2089049	367,35	4818730496	3217023744	2	62,51	367,35	355483328

Naměřené hodnoty A2

STAT	Amax	Fmax	Amax	Rmo	Fmax	E	E	X	Fx	Fm	Āx
	mm	N	mm	MPa	N	N/mm2	N/mm2	mm	N	N	kPa
Počet zkoušek	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Průměrná hodnota zkoušek	12,452	366,159	12,45	592,34	366,16	21903,19	17585,51	2	67,22	366,16	108744,56
Směrodatná odchylka zkoušek	3,4765	171,457	3,48	277,37	171,46	7699,94	6188,72	0	26,96	171,46	43620,42
Variační koeficient zkoušek	27,918	46,8259	27,92	46,83	46,83	35,15	35,19	0	40,11	46,83	40,11
Minimální hodnota zkoušek	4,9091	119,142	4,91	192,74	119,14	13250,4	10460,15	2	34,21	119,14	55336,43
Maximální hodnota zkoušek	14,992	573,097	14,99	927,11	573,1	30805,66	26816,92	2	104,93	573,1	169754,17
Nejistota typu A zkoušek	3,4765	171,457	3,48	277,37	171,46	7699,94	6188,72	0	26,96	171,46	43620,42

Zkouška	Amax	Fmax	Amax	Rmo	Fmax	E	E	X	Fx	Fm	Āx
	mm	N	mm	MPa	N	N/mm2	N/mm2	mm	N	N	kPa
8	14,992	258,921	14,99	418,86	258,92	13250,4	10460,15	2	42,94	258,92	69469,89
7	13,307	473,436	13,31	765,88	473,44	26266,23	21548,2	2	86,89	473,44	140570,44
6	14,831	506,729	14,83	819,74	506,73	27759,65	20693,68	2	85,4	506,73	138151,17
5	12,943	573,097	12,94	927,11	573,1	30805,66	26816,92	2	104,93	573,1	169754,17
4	13,743	521,424	13,74	843,52	521,42	30782,31	22978,75	2	88,76	521,42	143588,23
3	14,992	272,538	14,99	440,89	272,54	13856,39	11010,24	2	34,21	272,54	55336,43
2	9,9015	203,982	9,9	329,98	203,98	16014,56	12477,17	2	44,67	203,98	72271,24
1	4,9091	119,142	4,91	192,74	119,14	16490,32	14698,95	2	49,96	119,14	80814,91

Naměřené hodnoty BN

STAT	Amax	Fmax	Amax	Rmo	Fmax	E	E	X	Fx	Fm	Āx
	mm	N	mm	MPa	N	N/mm2	N/mm2	mm	N	N	kPa
Počet zkoušek	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Průměrná hodnota zkoušek	14,846	498,73	14,85	719,72	498,73	20691,48	17797,52	2	63,78	498,73	92007,84
Směrodatná odchylka zkoušek	0,2319	28,487	0,23	58,09	28,49	1046,04	1978,45	0	4,42	28,49	7599,15
Variační koeficient zkoušek	1,5623	5,712	1,56	8,07	5,71	5,06	11,12	0	6,94	5,71	8,26
Minimální hodnota zkoušek	14,462	458,1	14,46	671,69	458,1	19241,44	16324,45	2	58,34	458,1	82335,11
Maximální hodnota zkoušek	14,993	528,43	14,99	801,52	528,43	21465,83	20801,54	2	68,45	528,43	98987,95
Nejistota typu A zkoušek	0,2319	28,487	0,23	58,09	28,49	1046,04	1978,45	0	4,42	28,49	7599,15

Zkouška	Amax	Fmax	Amax	Rmo	Fmax	E	E	X	Fx	Fm	Āx
	mm	N	mm	MPa	N	N/mm2	N/mm2	mm	N	N	kPa
5	14,992	458,1	14,99	671,69	458,1	21420,6	16332,18	2	58,34	458,1	85539,22
4	14,993	497,49	14,99	801,52	497,49	21465,83	20801,54	2	61,44	497,49	98987,95
3	14,789	528,43	14,79	760,33	528,43	21420,26	18840,29	2	68,22	528,43	98153,27
2	14,992	522,67	14,99	689,04	522,67	19909,28	16324,45	2	62,46	522,67	82335,11
1	14,462	486,94	14,46	676,03	486,94	19241,44	16689,16	2	68,45	486,94	95023,68

Naměřené hodnoty B1

STAT	Amax	Fmax	Amax	Rmo	Fmax	E	E	X	Fx	Fm	Āx
	mm	N	mm	MPa	N	N/mm2	N/mm2	mm	N	N	kPa
Počet zkoušek	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
Průměrná hodnota zkoušek	10,405	312,911	10,4	506,2	312,91	20562,11	15995,15	2,43	54,68	312,91	88452,9
Směrodatná odchylka zkoušek	5,8415	164,929	5,84	266,81	164,93	9177,41	7351,88	1,13	25,43	164,93	41137,04
Variační koeficient zkoušek	56,142	52,7079	56,14	52,71	52,71	44,63	45,96	46,7	46,51	52,71	46,51
Minimální hodnota zkoušek	0	4,01094	0	6,49	4,01	0	0	2	0	4,01	0
Maximální hodnota zkoušek	14,985	448,374	14,98	725,34	448,37	25812,5	21433,82	5	80	448,37	129416,3
Nejistota typu A zkoušek	5,8415	164,929	5,84	266,81	164,93	9177,41	7351,88	1,13	25,43	164,93	41137,04

Zkouška	Amax	Fmax	Amax	Rmo	Fmax	E	E	X	Fx	Fm	Āx
	mm	N	mm	MPa	N	N/mm2	N/mm2	mm	N	N	kPa
7	14,985	448,374	14,98	725,34	448,37	23663,32	18122,64	2	54,59	448,37	88314,54
6	10,568	373,978	10,57	604,99	373,98	25812,5	21433,82	2	80	373,98	129416,3
5	0	4,01094	0	6,49	4,01	0	0	5	0	4,01	0
4	14,152	426,068	14,15	689,26	426,07	25281,64	18234,6	2	60,7	426,07	98195,25
3	14,696	374,45	14,7	605,75	374,45	21933,79	15431,89	2	58,98	374,45	95419,44
2	13,7	398,315	13,7	644,36	398,32	24736,66	17608,32	2	66,63	398,32	107795,9
1	4,7335	165,179	4,73	267,21	165,18	22506,87	21134,79	2	61,83	165,18	100028,8

Naměřené hodnoty B2

STAT	Amax	Fmax	Amax	Rmo	Fmax	E	E	X	Fx	Fm	Āx
	mm	N	mm	MPa	N	N/mm2	N/mm2	mm	N	N	kPa
Počet zkoušek	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Průměrná hodnota zkoušek	3,54869	92,68774	3,55	140,3	92,69	8351,53	7173,67	2	24,31	92,69	36597,06
Směrodatná odchylka zkoušek	5,07191	139,5765	5,07	212,47	139,58	9780,85	8400,42	0	28,76	139,58	43465,8
Variační koeficient zkoušek	142,924	150,5878	142,9	151,44	150,59	117,11	117,1	0	118,3	150,59	118,77
Minimální hodnota zkoušek	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
Maximální hodnota zkoušek	10,758	295,104	10,76	448,96	295,1	18703,4	16058,39	2	56,3	295,1	85653,05
Nejistota typu A zkoušek	5,07191	139,5765	5,07	212,47	139,58	9780,85	8400,42	0	28,76	139,58	43465,8

Zkouška	Amax	Fmax	Amax	Rmo	Fmax	E	E	X	Fx	Fm	Āx
	mm	N	mm	MPa	N	N/mm2	N/mm2	mm	N	N	kPa
4	3,43676	75,64695	3,44	112,23	75,65	14702,73	12636,27	2	40,94	75,65	60735,19
3	10,758	295,104	10,76	448,96	295,1	18703,4	16058,39	2	56,3	295,1	85653,05
2	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0

Charpyho test

Naměřené hodnoty

vzorek	číslo vzorku	h (mm)	b (mm)	E _{max} (J)	E (J/cm ²)
AN	1	1,75	11,54	12,98	64,27
	2	1,82	11,32	10,99	53,34
	3	1,79	11,02	11,12	56,37
	4	1,81	10,86	12,12	61,66
	3	1,66	10,33	11,71	68,29
A1	1	2,25	11,15	9,85	39,26
	2	2,52	11,79	9,26	31,17
	3	2,47	12,46	10,44	33,92
	4	2,16	11,36	9,9	40,35
	5	2,02	11,12	6,94	30,90
A2	1	2,81	11,76	10,26	31,05
	2	2,32	11,19	9,44	36,36
	3	2,64	10,91	9,84	34,16
	4	2,84	11,91	10,05	29,71
	5	2,71	10,19	7,71	27,92
BN	1	2,05	11,87	9,58	39,37
	2	2,28	9,91	10,8	47,80
B1	1	1,98	10,28	6,99	34,34
	2	1,96	10,45	8,35	40,77
	3	1,95	9,72	9,22	48,64
	4	1,96	11,93	8,64	36,95
	5	1,78	10,18	8,08	44,59
B2	1	1,84	9,73	5,86	32,73
	2	1,94	10,82	7,94	37,83
	3	1,95	10,47	8,26	40,46
	4	1,93	9,84	7,71	40,60
	5	1,95	11,02	7,67	35,69
CN	1	2,08	11,23	11,2	47,95
	2	2,43	12,02	15,34	52,52
C1	1	1,59	10,18	6,31	38,98
	2	1,55	10,25	8,17	51,42
	3	1,6	10,17	5,2	31,96
	4	1,55	10,11	6,09	38,86
	5	1,62	10,71	6,04	34,81
C2	1	1,72	9,43	6,02	37,12
	2	1,77	9,95	7,06	40,09
	3	1,76	9,15	6,25	38,81